УДК 621.181.001.4:621.18

ИЗМЕНЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СЕЧЕНИЯХ КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Л.Л. Любимова, А.А. Ташлыков, А.А. Макеев, А.С. Заворин, А.И. Артамонцев, Б.В. Лебедев

Томский политехнический университет
E-mail: ghost@tpu.ru

Представлены результаты перераспределения внутренних остаточных напряжений в стенке котельной трубы из перспективной энергетической стали Ди-59 аустенитного класса под действием внешнего циклического механического деформирования и установлена зависимость структурной микроповреждаемости за счет трещинообразования от цикличности нагружения.

Введение

К факторам эксплуатационного воздействия на трубопроводы пароводяного тракта котлов, влияющим на работоспособность, относятся не только напряжения от внутреннего давления, но и значительно более высокие внешние механические нагрузки. Они приводят к перераспределению внутренних структурных напряжений в стенке котельной трубы, тем самым изменяют индивидуальный ресурс элементов трубопроводов. Анализ публикаций последних лет показывает, что роль внутренних структурных напряжений или не дооценивается, или не учитывается вовсе. Отсутствие критериального параметра и функциональных зависимостей, определяющих влияние внешних механических нагрузок на микроповреждаемость, обусловило цель настоящей работы, которая заключалась в установлении характера перераспределения внутренних напряжений в стенке котельной трубы от внешнего циклического механического деформирования. Так как за критериальный параметр физического состояния выбраны внутренние остаточные напряжения, то в качестве базового метода исследования применен метод рентгеновской дифракции, способный к их определению по сдвигу или физическому уширению дифракционных линий.

Методика исследования

Исследования структурно-напряженного состояния проведены на образце котельной трубы из перспективной стали Ди-59 при температуре 20 °С. Методика исследования сводилась к организации процесса форсированного искусственного старения образца произвольной формы в ходе холодного циклического деформирования гидравлическим прессом с возрастающей нагрузкой в каждом очередном цикле деформирования.

После каждого цикла нагружения производилась рентгеносъемка исследуемого образца на рентгеновском аппарате ДРОН-3,0 с использованием монохроматизированного излучения с длиной волны $\lambda_{CuK\beta}$=1,39217 Å. Анализ внутренних остаточных напряжений выполнен по методике [1], в качестве аналитических выбраны дифракционные линии (111) и (220).

Длина зональной трещины рассчитывалась на основании [2] по остаточным после каждого деформирования напряжениям σ_1:

$$L = \frac{2\gamma G}{\pi(1-\mu)\sigma_n^2},$$

где γ=2·10^{-4} – поверхностная энергия, МПа·см; G=8·10^4 – модуль сдвига, МПа; μ=0,27 – коэффи-

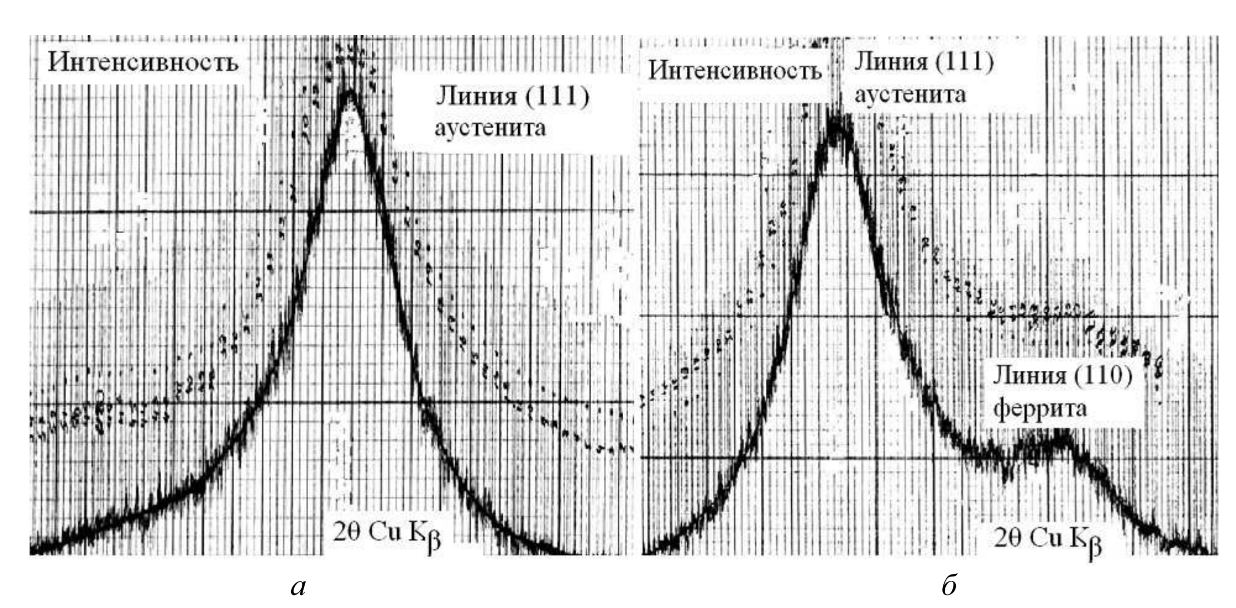


Рис. 1. *Фрагмент дифрактограммы образца трубы: а) наружная; б) внутренняя сторона*

циент Пуассона; σ_n – остаточные после каждого деформирования напряжения σ_I, МПа.

Так как рентгенофазовый анализ образца трубы в состоянии поставки обнаружил фазовую неоднородность наружной и внутренней поверхности в виде остаточного феррита на наружной поверхности (рис. 1), то съемка рентгенограмм велась с наружной и внутренней поверхностей образца. При этом ставились задачи: установление связи величины внутренних напряжений второго рода от плотности структурных дефектов; установление влияния цикличности нагружения на перераспределение внутренних напряжений первого рода; установление влияния цикличности нагружения на возникновение и рост структурной трещины.

Экспериментальные результаты

Перераспределение внутренних напряжений I рода σ_I (зональных) в стенке котельной трубы в процессе внешнего циклического деформирования и зависимость длины зональной трещины *L* от внешней нагрузки представлены на рис. 2, 3. Цифрами на кривых изменения внутренних напряжений обозначены циклы нагружения образца.

Из рис. 2 видно, что внутренние напряжения на разных поверхностях трубы ведут себя по-разному. Общим в характере поведения внутренних напряжений является цикличность изменения – от повышения и упрочнения в точках 2, 4, 6, 7, (рис. 2, *а*) и 2, 5, 10 (рис. 2, *б*) до снижения и разупрочнения в точках 1, 3, 5, 8 (рис. 2, *а*) и 3, 9, 11 (рис. 2, *б*). В циклах 9 – 10 (рис. 2, *а*) и 12, 22 (рис. 2, *б*) наблюдается релаксация внутренних напряжений, связанная с разрушением зерна при деформировании, чему соответствует рост структурной трещины (рис. 3). На наружной стороне трубы трещина размером 4300 мкм возникает при внешней нагрузке 157 МПа (σ_I=5,7 МПа); внутренняя поверхность обладает более высоким пределом прочности, сопротивляется разрушению в широком диапазоне внешних давлений и обнаруживает трещину при нагрузке 265 МПа; размер трещины при этом оценивается величиной 268 мкм. В реальном оборудовании возникновение макротрещин такого размера может привести к разрушению элементов трубопровода. Характер перераспределения внутренних напряжений на наружной поверхности после возникновения трещины при дальнейшем деформировании образца в целом аналогичен предыдущему этапу – под нагрузкой проявляется цикличность процессов упрочнения-разупрочнения с увеличением напряжений в точках 12, 15, 17, 18, 19, 22 и их понижением в точках 4, 16, 20, 23, 24, 25 (рис. 2, *а*).

На внутренней поверхности трубы (рис. 2, *б*) после образования первой трещины внутренние напряжения при дальнейшем деформировании колеблются в диапазоне 100...300 МПа, существенного упрочнения не наблюдается, глубина релаксации незначительная, что свидетельствует о постоянном микротрещинообразовании, накоплении повреждаемости, но о нераспространении трещины. Объединение трещин в магистральную и релаксация внутренних напряжений происходит лишь после 21-го цикла нагружения, при этом структурная трещина превышает 1 мм (рис. 3, *б*).

Обсуждение результатов

Одно из представлений, объясняющих расхождение между теоретической и экспериментальной прочностью, а также эффекты упрочнения и разупрочнения реальных металлов, основано на учении о несовершенствах кристаллической решетки –

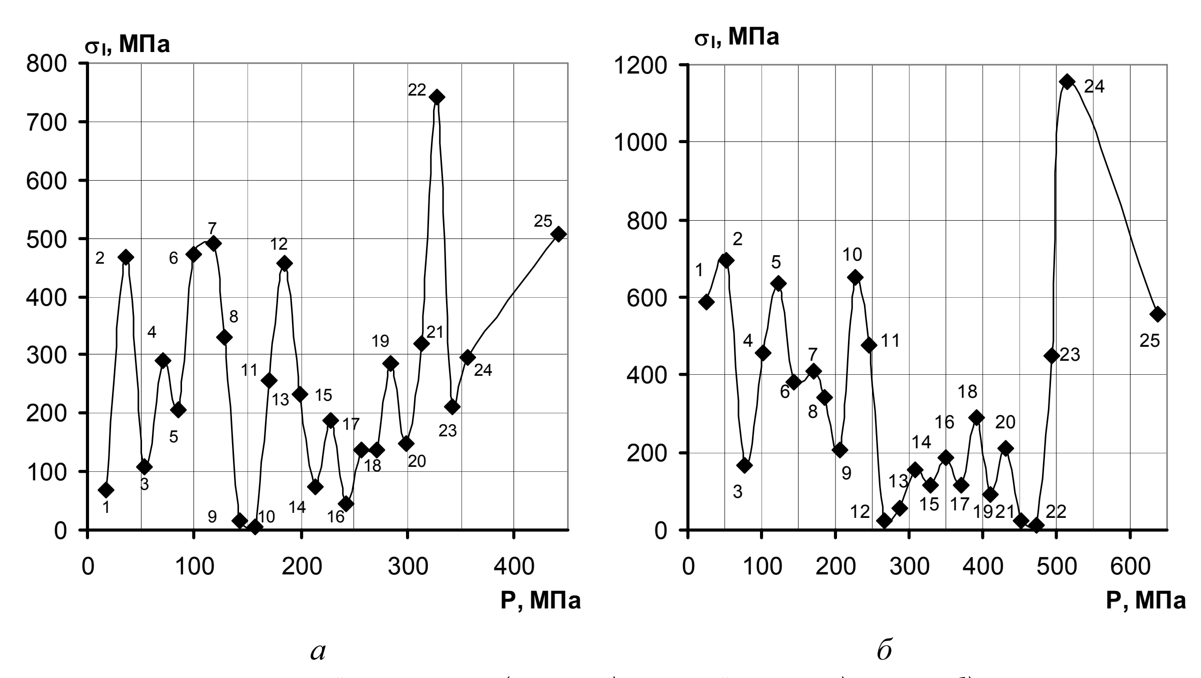


Рис. 2. *Зависимость напряжений первого рода σ_I (зональных) от внешней нагрузки: а) наружная; б) внутренняя сторона трубы*

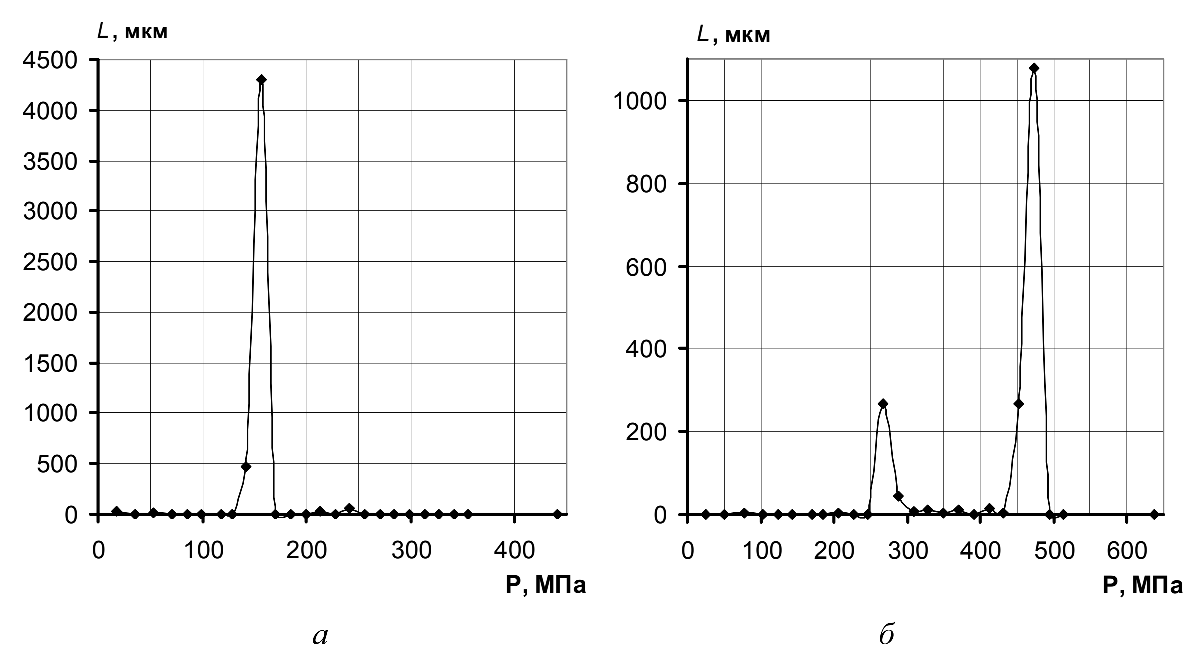


Рис. 3. *Зависимость длины зональной трещины L от внешней нагрузки: а) наружная; б) внутренняя сторона трубы*

дислокациях, согласно которому вокруг дислокаций существуют силовые поля, взаимодействующие между собой при сближении дислокаций. Дислокации одного знака, расположенные в одной плоскости скольжения, взаимно отталкиваются, что препятствует их продвижению. С увеличением плотности дислокаций число таких препятствий будет увеличиваться, что приведет к повышению сопротивляемости деформированию металла [3]. Влияние плотности дислокаций на сопротивляемость деформированию представлено на рис. 4.

Согласно гипотезе И.А. Одинга [3] (рис. 4, *а*) наибольшую сопротивляемость пластическому деформированию должен оказывать металл с очень малой плотностью дислокаций. По мере увеличения плотности дислокаций сопротивление пластическому деформированию уменьшается до некоторого критического значения плотности $\rho_{кр}$. При достижении этой плотности дислокаций начинается взаимодействие силовых полей, окружающих дислокацию, что вызывает увеличение сопротивления пластическому деформированию. При этом изменяется предел упругости [3].

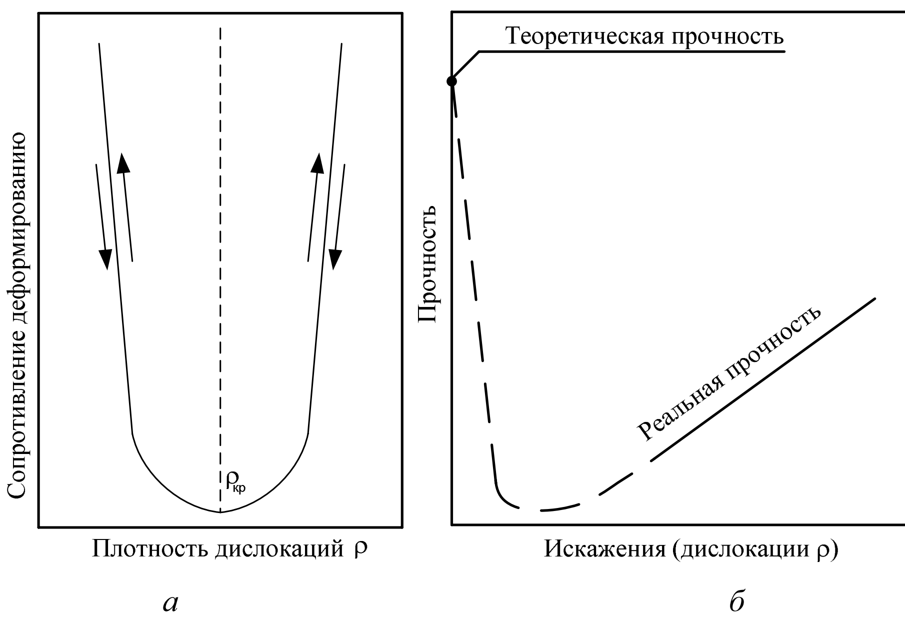


Рис. 4. *Сопротивление деформированию от плотности структурных дефектов в соответствии с гипотезой: а) И.А. Одинга [3]; б) А.А. Бочвара [4]*

Вторая гипотеза принадлежит А.А. Бочвару (рис. 4, *б*), согласно которой реальная прочность металла падает с увеличением дислокаций до некоторого значения, достигнув которого, вновь начинает возрастать. Повышение реальной прочности объясняется тем, что при этом возникают не только параллельные дислокации, но и дислокации в разных плоскостях и направлениях, которые будут мешать друг другу перемещаться, и реальная прочность металла вновь повысится [4].

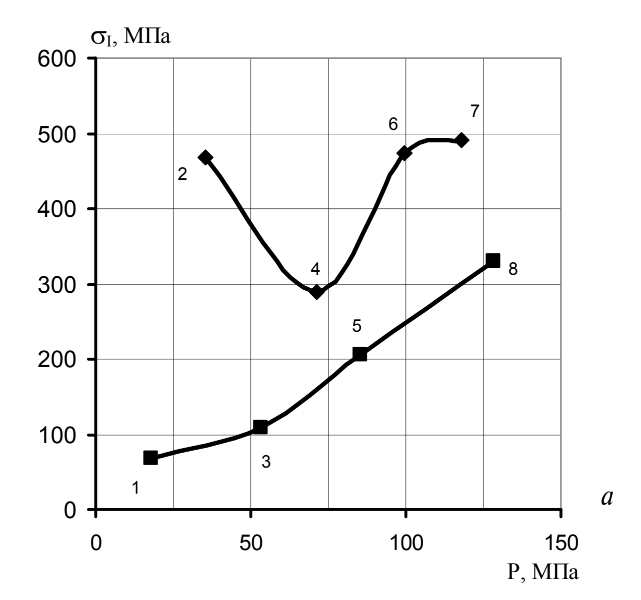
Таким образом, обе кривые (рис. 4) характеризуют изменение реальной прочности металлов за счет пластического деформирования: если низка способность металла к пластическому деформированию, он находится в хрупком состоянии и склонен к внезапным хрупким разрушениям.

Приведенные кривые (рис. 4) носят чисто умозаключительный характер; экспериментальных подтверждений этим кривым в литературе не обнаружено.

В настоящей работе получены зависимости в координатах «внутренние структурные напряжения I рода – внешние механические нагрузки» (рис. 2), экспериментально подтверждающие цикличность процессов упрочнения-разупрочнения, соответствующих гипотезе И.А. Одинга. Разный уровень внутренних напряжений на разных поверхностях трубы, характеризующих разупрочнение и наклеп поверхности при внешнем циклическом нагружении, имитирующем процесс ускоренного усталостного разрушения (492 и 742 МПа соответственно для циклов 7 и 22 наружной стороны; 693 и 1158 МПа для циклов 2 и 24 внутренней поверхности на рис. 2), различная степень микроповреждаемости в процессе усталостного разрушения (рис. 3) связываются с разными структурой и свойствами поверхностей из-за фазовой неоднородности (рис. 1). В связи с этим следует ожидать, что они будут обладать и различными ресурсными характеристиками – жаропрочностью, длительной прочностью и длительной пластичностью. Таким образом, внутренние напряжения определяют индивидуальный физический ресурс, зависящий от природы материала трубы, его структуры, особенностей изготовления и термообработки, что необходимо учитывать при расчете паркового и определении остаточного ресурса, позволяют устанавливать не только структурную неоднородность, текущее состояние, но и прогнозировать поведение трубных поверхностей в процессе эксплуатации – значит, могут служить диагностическим признаком упрочнения-разупрочнения.

Кроме того, соединение точек достижения минимального и максимального на рис. 2 уровня внутренних напряжений при деформировании дает кривые (рис. 5), обнаруживающие сходство с приведенными на рис. 4.

На рис. 5 выделяется область, характеризующая реакцию металла на циклическое разрушение, расположенная между двумя кривыми – упрочнения и



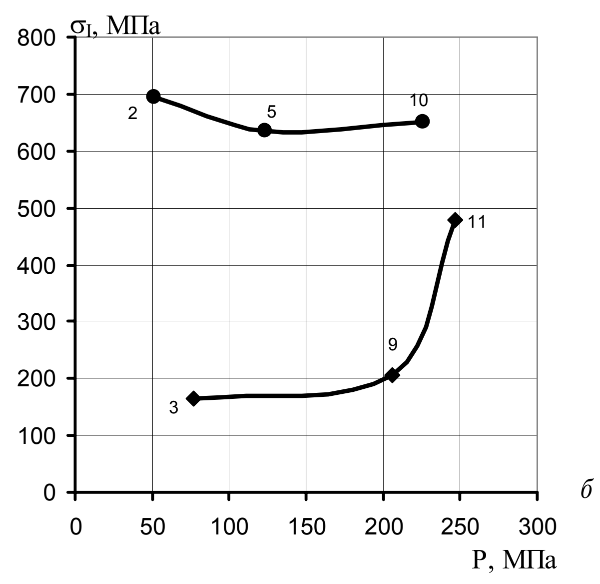


Рис. 5. *Зоны упрочнения-разупрочнения в зависимости от внешней нагрузки в образце трубы до разрушения: а) наружная; б) внутренняя сторона трубы*

разупрочнения; причем кривые упрочнения (2, 4, 6, 7, рис. 5, *а*, и 2, 5, 10, рис. 5, *б*) близки к кривой И.А. Одинга, а кривые разупрочнения (1, 3, 5, 8, рис. 5, *а*, и 3, 9, 11, рис. 5, *б*) – более соответствуют гипотезе А.А. Бочвара. Свойства стенки трубы лимитируются этими кривыми, а текущее физическое состояние определяется точкой на этих кривых. Если оно соответствует, например, точкам 1, 3, 5 (рис. 5, *а*), металл стенки трубы пластичен, за счет чего при ползучести происходит его упрочнение и возникают разрывы, следствием чего является пористость в межзеренных границах при термических или внешних механических нагрузках и разупрочнение за счет пористости, обусловливающие дальнейшую ползучесть с постоянным нарастанием пористости при ползучести в процессе эксплуатации. Практика эксплуатации котельных труб

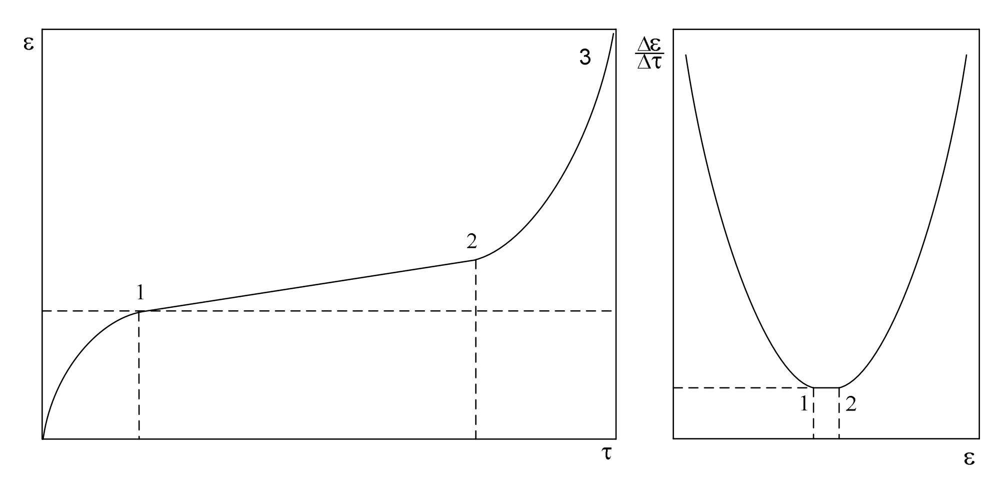


Рис. 6. *Зависимость скорости ползучести $\Delta\varepsilon/\Delta\tau$ от остаточной деформации ε [5]*

подтверждает, что микропоры ползучести возникают практически с первых часов работы трубопроводов. Описанный процесс разрушения соответствует классической кривой ползучести в ее установившейся стадии, линия 1–2, накоплению повреждаемости и разрушению на линии 2–3 (рис. 6) [5]. При этом парковый ресурс трубы в стадии установившейся ползучести может быть оценен в соответствии с [6].

Из кривых (рис. 5) также следует, что металл стенки трубы может находиться в стадии предразрушения – это точки 8 и 11 (рис. 5), когда очередной цикл нагружения приводит к образованию макротрещин (рис. 3), способных развиться в магистральную. В нормативных документах [7] четко не обоснована степень поврежденности металла как критерий достижения потенциально опасного состояния паропровода, поскольку особенности разрушения и проблемы диагностики хрупких разрушений до настоящего времени вызывают острые дискуссии в связи с тем, что у конструкторов и производителей металлоизделий нет достаточной научной базы для диагностики и оценки факторов, вызывающих хрупкое разрушение; все существующие расчеты на прочность и разработанные нормы для определения пригодности металла следует относить только к случаям вязкого разрушения [8].

Полученные экспериментальные результаты рентгенодиагностики позволяют сформулировать следующие признаки опасности возникновения хрупкого разрушения, заключающиеся в том, что металл стенки трубы в предельном состоянии должен находиться на линии разупрочнения (рис. 5), а отношение текущего внутреннего напряжения к максимально достигнутому при циклическом деформировании должно быть ≥0,67 для данной марки стали. Так, для наружной поверхности (точка 8) это отношение равно σ_i/σ_{max}=331/492=0.67, а для внутренней (точка 11) σ_i/σ_{max}=478/694=0.67. Из рис. 5 следует также, что в процессе форсированного старения образца обнаруживается тенденция увеличения отношения σ_i/σ_{max}, снижается хрупкая прочность трубы в ресурсе.

Подобный критерий склонности стали к хрупкому разрушению приведен в [9] для марганцовистой аустенитной стали 110Г13Л, где опасность возникновения хрупких разрушений определяется отношением предела текучести $\sigma_{0,2}$ к временному сопротивлению разрушению $\sigma_в$. В частности, отмечается, что при отношении $\sigma_{0,2}/\sigma_в$=0,88 сталь склонна к хрупкому разрушению, а при $\sigma_{0,2}/\sigma_в$=(0,4...0,42) – нет.

Прикладное значение

В настоящее время для оценки работоспособности высоконапряженных элементов оборудования теплоэлектростанций, таких как гибы труб, паропроводы, поверхности нагрева и т. д., производится контроль по микроповреждаемости, для выявления которой регламентирован метод реплик [6, 10]. Однако, как показывает практика диагностики и определения остаточного ресурса трубопровода, обнаруживаются существенные различия в результатах контроля методом реплик, ультразвукового контроля и магнитопорошковой дефектоскопии. И если метод реплик показывает, например, 5-ый балл повреждаемости, т. е. предельное состояние трубопровода, то эти методы дефектов не обнаруживают [7]. Кроме неоднозначности результатов диагностики, следовательно, и прогнозирования остаточного ресурса, они относятся к констатирующим наличие поврежденности методам, но не дают прогноза на развитие разупрочнения, тогда как полученные кривые (аналогичные кривым И.А. Одинга) позволяют определять текущее состояние, прогнозировать поведение металла трубы, например, при гидропрессовках, отбраковывать трубы на уровне входного контроля, сводя к минимуму риск эксплуатационной повреждаемости труб.

В частности, в [11, 12] приводится выражение для вычисления критического давления опрессовки труб $P_{опр}$ при проведении предпусковых испытаний котла с учетом внутренних структурных напряжений, которые не учитываются в нормах расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов:

$$P_{опр} = 4\delta \frac{0{,}1E\sqrt{\frac{a}{\pi D}} - \sigma_{стр}}{d_{нар} + d_{вн}},$$

где D – средний размер зерна, Å; E – модуль нормальной упругости, МПа; δ – толщина стенки трубы, мм; $d_{нар}$, $d_{вн}$ – наружный и внутренний диаметр трубы, мм; a – параметр элементарной ячейки, Å; $\delta_{стр}$ – внутреннее структурное напряжение, МПа.

Показано, что нормативный метод расчета дает давление для проведения гидравлических испытаний трубы конкретных размеров, давления и температуры, равное, например, 17 МПа. С учетом внутриструктурных напряжений, составляющих 420 МПа, это давление может быть равно 10,4 МПа. В соответствии с экспериментальными данными расчетное значение структурного напряжения для давления опрессовки 17 МПа должно составить 220...250 МПа. Таким образом, учитывая в расчетах на прочность внутриструктурные напряжения, приходим к выводу, что используемое на практике значение давления опрессовки может привести к структурной микроповреждаемости труб, поэтому величина пробного давления с учетом внутриструктурных напряжений при операциях опрессовки является фактором долговечности и эксплуатационной надежности труб котлов как на этапе входного, так и текущего диагностического контроля.

Заключение

Выполненные исследования по установлению характера перераспределения внутренних остаточных напряжений в стенке котельной трубы из перспективной энергетической стали Ди-59 аустенитного класса под действием внешнего циклического механического деформирования позволяют заключить, что внутренние структурные напряжения могут служить диагностическим признаком разупрочнения поверхностей нагрева по установленной зависимости структурной микроповреждаемости за счет трещинообразования от цикличности нагружения и рентгенометрических критериев трещинообразования, определяют индивидуальный ресурс трубы, зависящий от структуры и конкретного состояния. Это необходимо учитывать при расчетах паркового и прогнозировании остаточного ресурса, а метод механического циклического деформирования может применяться как для входного контроля труб, так и диагностики текущего состояния при прогнозировании и проведении предпусковых испытаний энергооборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любимова Л.Л. Методика рентгенометрического анализа внутриструктурных напряжений // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 4. – С. 72–77.
2. Иванова В.С., Городиенко А.К., Геминов В.И. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов. – М.: Металлургия, 1991. – 383 с.
3. Одинг И.А., Иванова В.С., Бурдукский В.В., Геминов В.И. Теория ползучести и длительной прочности металлов. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во по черной и цветной металлургии, 1959. – 487 с.
4. Гуляев А.П. Металловедение. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
5. Должанский П.Р. Особенности оценки остаточного ресурса паропроводных труб при эксплуатации сверх паркового ресурса // Теплоэнергетика. – 2005. – № 8. – С. 35–39.
6. РД 10-577-03. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. – М.: НПО «Промбезопасность», 2003. – 142 с.
7. Хапонен Н.А., Шевченко П.Н., Рассохин Г.И. Микроповрежденность как критерий оценки состояния металла и остаточного ресурса паропроводов ТЭС // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 5. – С. 42–44.
8. Насибов А.Г. О хрупком разрушении металла (стали) и пути предупреждения аварий // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 8. – С. 38.
9. Астафьев А.А. Влияние размера зерна на свойства марганцовистой аустенитной стали 110ГЗЛ // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1997. – № 5. – С. 15–18.
10. ОСТ 34-70-690-96. Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации. – М.: ВТИ, 1998. – 44 с.
11. Ташлыков А.А., Почуев В.Ф. Влияние факторов микроструктурной повреждаемости на опрессовку стальных труб // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. докл. IX Всеросс. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – Т. 1. – С. 192–196.
12. Ташлыков А.А., Почуев В.Ф. Рентгенометрическое выявление признаков разупрочнения котельных сталей // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – С. 168–171.